# 应用康奈尔净碳水化合物–蛋白质体系和NRC模型评价4种粮食加工副产物的营养价值[1]

高　红　郝小燕　张幸怡　王一臻　林　聪　张永根*

（东北农业大学动物科学技术学院，哈尔滨 150030）

摘　要：本试验旨在应用康奈尔净碳水化合物-蛋白质体系（CNCPS）和 NRC 模型评价 4 种粮食加工副产物的营养价值。从东北地区 4 个不同牧场采集了玉米纤维饲料、大豆皮、甜菜粕和豆渣 4 种粮食加工副产物，测定其营养成分，应用 CNCPS 模型对蛋白质和碳水化合物组分进行剖分，并预测其潜在营养价值供给量，应用 NRC 模型估测可消化养分和能值。结果表明：1）中性洗涤纤维（NDF）的含量由高到低依次为大豆皮、甜菜粕、玉米纤维饲料和豆渣；非蛋白氮（NPN）的含量由高到低依次为玉米纤维饲料、豆渣、甜菜粕和大豆皮；甜菜粕的酸性洗涤不溶粗蛋白质（ADICP）含量最高，其余依次为大豆皮、豆渣和玉米纤维饲料，其中玉米纤维饲料和豆渣的 ADICP 含量差异不显著($P$＞0.05)。2）非蛋白氮（PA，即 NPN）含量由高到低依次为玉米纤维饲料、豆渣、甜菜粕和大豆皮；真蛋白质（PB）含量由高到低依次为大豆皮、甜菜粕、豆渣和玉米纤维饲料；不可降解氮（PC）的含量由高到低依次为豆渣、甜菜粕、大豆皮和玉米纤维饲料。3）可代谢蛋白质（MP）含量由高到低依次为豆渣、大豆皮、甜菜粕和玉米纤维饲料。4）玉米纤维饲料和豆渣的维持水平总可消化养分（TDNm）含量较高，二者差异不显著($P$＞0.05)；生产水平泌乳净能（$NE_{LP}$）值由高到低依次为豆渣、玉米纤维饲料、大豆皮和甜菜粕，其中玉米纤维饲料的 $NE_{LP}$ 值与豆渣、大豆皮差异均不显著($P$＞0.05)；生产水平代谢能（$ME_P$）值由高到低依次为豆渣、玉米纤维饲料、甜菜粕和大豆皮。由此可见，玉米纤维饲料和大豆皮可以作为奶牛的纤维源饲料；豆渣的过瘤胃蛋白质（RUP）、MP 含量最高，可以作为奶牛的蛋白质源饲料。4 种粮食加工副产物的能值由高到低依次为豆渣、玉米纤维饲料、大豆皮、甜菜粕。

关键词：粮食加工副产物；营养成分；能值

---

收稿日期：2016-03-10

基金项目：国家奶牛产业技术体系（CARS-37）

作者简介：高　红（1991—），女，山东莒县人，硕士，从事反刍动物营养与生产研究。E-mail: 1551919741@qq.com

*通信作者：张永根，教授，博士生导师，E-mail:　zhangyonggen@sina.com

中图分类号：S816.11

我国是世界上奶牛存栏数较多的国家之一。随着人民生活水平的不断提高和经济的迅速发展，奶牛产业也呈现迅猛上升的趋势。我国是粮食生产大国，粮食加工的过程中伴随着大量的副产物产生，但是我国大部分粮食加工副产物利用率很低或是直接丢弃，不但造成了资源的浪费，还污染了环境[1]。因此，全面评价粮食加工副产物营养价值，可为其作为奶牛的饲料提供可靠的科学依据。

粮食加工副产物如大豆皮（soybean hulls，SH）的粗纤维含量较高，而木质素(ADL)含量较低，使得大豆皮可以作为反刍动物很好的粗饲料[2]。利用大豆皮替代泌乳奶牛精料中的部分玉米和小麦麸的试验结果显示，与对照组相比，奶牛的日产奶量等均没有显著差异，但是经济效益有显著增加[3]。玉米纤维饲料（dry corn gluten feed，DCGF）的蛋白质和纤维含量几乎是玉米的 3 倍[4]。已有研究表明，粮食加工副产物用作反刍动物、家禽、猪、水产动物的饲料，可至少节约 31.0%~46.8%的粮食类饲料，降低生产成本，提高经济效益[5-6]，因此，科学、全面地评价其营养价值具有重要的意义。康奈尔净碳水化合物-蛋白质体系（Cornell net carbohydrate and protein system,CNCPS）是美国康奈尔大学经过数十年的研究提出的一个预测瘤胃发酵时的动态模型[7]，它是一个基于瘤胃降解特征的饲料评价体系，将饲料化学成分与反刍动物瘤胃消化特点结合起来，对饲料的营养价值与动物生产性能进行预测，分析其价值。NRC（2001）制定的奶牛营养需要量标准在世界上具有很高影响力，许多国家和地区将该标准用作本地的基础和参考。根据模型的阐述，饲料蛋白质可以分为 3 部分，瘤胃可降解蛋白质（RDP）、过瘤胃蛋白质（RUP）和可代谢蛋白质（MP）。本试验应用 CNCPS 体系和 NRC 模型从营养成分测定、蛋白质和碳水化合物（CHO）组分的剖分、潜在应用价值预测以及能值估测等方面进行综合分析比较，研究了玉米纤维饲料、大豆皮、甜菜粕（sugar beet pulp，SBP）和豆渣（bear residue，BR）的营养价值，旨在为其在奶牛生产中科学、合理应用提供科学依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验材料

4 种粮食加工副产物包括玉米纤维饲料、大豆皮、甜菜粕和豆渣，分别来自吉林省松原

市嘉吉生化公司、英联饲料公司、齐齐哈尔市克东飞鹤牧场和九三豆制品厂。玉米纤维饲料是在湿法生产玉米淀粉时由玉米皮和浓缩的玉米浆以大约 2：1 的比例混合而成的一种富含可消化纤维和可消化蛋白质的纤维性饲料；大豆皮是采用去皮浸出法生产大豆粕的一种主要副产品；甜菜粕是甜菜在制糖过程中经切丝、渗出、充分提取糖分后含糖很少的菜丝，烘干制粒；豆渣是豆类经加工、磨制豆腐或豆浆及豆奶等产品后的副产品。样品经风干、粉碎并过 1 mm 分析筛后放入自封袋中 4 ℃保存备用。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 常规营养成分测定

干物质(DM)、粗蛋白质(CP)、粗脂肪(EE)、粗灰分(Ash)、淀粉（starch）的含量测定按照 AOAC[8]方法测定；酸性洗涤纤维(ADF)、酸性洗涤木质素(ADL)、中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤不溶粗蛋白质(ADICP)、中性洗涤纤维不溶粗蛋白质(NDICP)的含量测定按照 Van Soest 等[9]的方法测定；可溶性粗蛋白质(SCP)的含量按照 Krishnamoorthy 等[10]的方法测定；非蛋白氮(NPN)的含量按照 Licitra 等[11]方法测定。测定营养成分的重复数为 3 个。

#### 1.2.2 CNCPS 对蛋白质组分和 CHO 组分的剖分

在 CNCPS 蛋白质剖分体系中，饲料蛋白质分为 3 个组分：非蛋白氮（PA,即 NPN）、真蛋白质（PB）、不可降解氮（PC），其中 PB 又可分为快速降解真蛋白质（$PB_1$）、中速降解真蛋白质（$PB_2$）和慢速降解真蛋白质（$PB_3$），计算公式如下[12]：

PA（%CP）=NPN（%SCP）×SCP（%CP）×0.01；

$PB_1$（%CP）=SCP（%CP）－PA（%CP）；

PC（%CP）=ADICP（%CP）；

$PB_3$（%CP）=NDICP（%CP）－ADICP（%CP）；

$PB_2$（%CP）=1－PA（%CP）－$PB_1$（%CP）－$PB_3$（%CP）－PC（%CP）。

利用 CNCPS 将饲料 CHO 剖分为 4 部分：快速降解碳水化合物(CA)、中速降解碳水化合物（$CB_1$）、缓慢降解碳水化合物（$CB_2$）和不可利用碳水化合物（CC）。CA 为糖类，

$CB_1$ 为淀粉和果胶，$CB_2$ 为可利用纤维，CC 为不可利用纤维，是 ADL 的 2.4 倍。其中 CA、$CB_1$ 为非结构性碳水化合物（NSC），$CB_2$、CC 为结构性碳水化合物（SC）。计算公式如下[12]：

CHO(%DM)=1–CP(%DM)－EE(%DM)－Ash(%DM)；

CC(%CHO)=100×[NDF(%DM)×0.01×ADL(%NDF)×2.4]/CHO(%DM)；

$CB_2$(%CHO)=100×[NDF(%DM)－NDICP(%CP)×0.01×CP(%DM)－NDF(%DM)×0.01×ADL(%NDF)×2.4/CHO(%DM)]；

NSC(%CHO)=1－$CB_2$(%CHO)－CC(%CHO)；

$CB_1$(%CHO)=[1－starch(%NSC)]×[1－$CB_2$(%CHO)－CC(%CHO)]。

1.2.3　利用 CNCPS 模型预测不同粮食加工副产物潜在营养价值供给量

根据 CNCPS 模型预测不同原料潜在营养价值供给量的指标包括 RDP、RUP 和 MP，其中 MP 的供给量由菌体蛋白质（MCP）、可吸收菌体蛋白质（AMCP）、可吸收过瘤胃蛋白质（ARUP）、可吸收内源蛋白质（AECP）计算得出[12]。

在 CNCPS 模型中，分别以 4 种试验原料为单一饲料饲粮，衡量瘤胃能氮平衡（rumen energy nitrogen balance，RENB），用瘤胃可降解蛋白可合成菌体蛋白质（$MCP_{RDP}$）和总可消化养分（TDN）可合成菌体蛋白质（$MCP_{TDN}$）之间的差值来预测，计算公式如下[12-13]：

$RDP=A+B\times[K_d/(K_d+K_p)]$；

$RUP=B\times[K_p/(K_d+K_p)]+C$。

式中：$A$ 表示快速降解粗蛋白质部分，$B$ 表示可降解粗蛋白质部分，$C$ 表示完全不降解粗蛋白质部分；$K_d$ 表示 $B$ 的降解速率；$K_p$ 表示待测饲料瘤胃流通速率。

$MCP$(g/kg DM)=0.13×$TDN_m$×$eNDFadj$。

式中：$TDN_m$ 为维持水平总可消化养分。当物理有效中性洗涤纤维（peNDF）/NDF>20%时，$eNDFadj$ 取 1.0；当 peNDF/NDF<20%时，$eNDFadj$=1.0－[(20－peNDF)×0.025]。

AMCP(g/kg DM)=0.80×0.80×MCP。

式中：MCP 中 80%为 PB，可在小肠内吸收[NRC（2001）]。

ARUP=RUP×dRUP。

式中：dRUP 为可消化过瘤胃蛋白，估计值为 0.85。

ECP(g/kg DM)=6.25×1.9×DM(g/kg)。

式中：*ECP* 为内源蛋白质，其中 50%的 ECP 能到达十二指肠，且 80%为 PB[NRC（2001）]。

AECP(g/kg DM)=0.50×0.80×ECP；

MP(g/kg DM)=ARUP+AMCP+AECP；

RENB=$MCP_{TDN}$－$MCP_{RDP}$；

$MCP_{TDN}$=0.13×TDN；

$MCP_{RDP}$=0.9×RDP。

1.2.4　NRC 模型估测真可消化养分与能值

使用 NRC（2001）奶牛估测模型来估测 4 种饲料原料奶牛瘤胃真可消化粗蛋白质（tdCP）、真可消化脂肪酸（tdFA）、真可消化中性洗涤纤维（tdNDF）、真可消化非纤维碳水化合物（tdNFC）、维持水平总可消化养分（$TDN_m$）、生产水平消化能（$DE_p$）、生产水平代谢能（$ME_p$）、生产水平泌乳净能（$NE_{LP}$）[14]。使用 NRC（1996）肉牛模型估测维持净能（$NE_m$）和增重净能（$NE_g$）[15]，计算公式如下：

tdNFC=0.98×[100－((NDF－NDICP)+CP+EE+Ash)]×PAF。

式中：*PAF* 为加工校正因子。

tdCP=CP×exp[-1.2×(ADICP/CP)]；

tdFA=FA=(EE－1)。

式中：*FA* 为脂肪酸，如果 EE<1，则 FA=0。

$tdNDF=0.75\times(NDF-NDICP-ADL)\times[1-(ADL/(NDF-NDICP)^{0.667}]$；

$TDN_m=tdNFC+tdCP+(tdFA\times2.25)+tdNDF-7$；

$DE_{1X}=(tdNFC/100)\times4.2+(tdNDF/100)\times4.2+(tdCP/100)\times5.6+(FA/100)\times9.4-0.3$；

折扣系数$=[(TDN_m-(0.18\times TDN_m)-10.3))\times2]/TDN_m$。

如果 $TDN_m$<60%，消化率的折扣忽略不计。

$DE_P=DE_{1X}\times$折扣系数；

$ME_P=1.01\times DE_P-0.45$；

$NE_{LP}=(0.703\times ME_P)-0.19$；

$NE_m=1.37\times(DE_{1X}\times0.82)-0.138\times(DE_{1X}\times0.82)^2+0.0105\times(DE_{1X}\times0.82)^3-1.12$；

$NE_g=1.42\times(DE_{1X}\times0.82)-0.174\times(DE_{1X}\times0.82)^2+0.0122\times(DE_{1X}\times0.82)^3-1.65$。

### 1.3 数据处理

所有数据采用 Excel 2007 进行基本处理，再用 SAS 9.2 中的 MIXED 模型进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同粮食加工副产物营养成分

从表 1 可见，不同粮食加工副产物的营养成分差异较大。甜菜粕的 EE 含量最低（4.8 g/kg DM），而大豆皮的 EE 含量最高（50.0 g/kg DM），二者差异显著（*P*<0.05）；大豆皮的 NDF 和 ADF 含量最高，显著高于其他粮食加工副产物（*P*<0.05）；玉米纤维饲料的淀粉含量最高（106.3 g/kg DM），显著高于其他粮食加工副产物（*P*<0.05）；甜菜粕的 CHO 含量最高（807.0 g/kg DM），显著高于其他粮食加工副产物（*P*<0.05）；豆渣的 CP 含量最高（231.2 g/kg DM），显著高于其他粮食加工副产物（*P*<0.05），甜菜粕的 CP 含量最低（129.5 g/kg DM），显著低于其他粮食加工副产物（*P*<0.05）；玉米纤维饲料的 SCP 含量最高（643.8 g/kg

CP)，显著高于其他粮食加工副产物（$P$<0.05)，甜菜粕的 SCP 含量最低（238.8 g/kg CP)，显著低于其他粮食加工副产物（$P$<0.05)；甜菜粕的 NDICP 和 ADICP 含量最高，显著高于其他粮食加工副产物（$P$<0.05)。

表 1　不同粮食加工副产物营养成分

Table 1　Nutrient component of different by-products of food processing　（$n$=3）

| 项目 Items | 玉米纤维饲料 DCGF | 大豆皮 SH | 甜菜粕 SBP | 豆渣 BR | 标准误 SEM |
|---|---|---|---|---|---|
| 干物质 DM/(g/kg) | 942.2$^{a}$ | 910.6$^{b}$ | 895.6$^{c}$ | 279.5$^{d}$ | 2.6 |
| 粗灰分 Ash/(g/kg DM) | 60.5$^{a}$ | 44.4$^{b}$ | 57.3a | 37.0c | 1.2 |
| 有机物 OM/(g/kg DM) | 939.5$^{c}$ | 955.6$^{b}$ | 942.7$^{c}$ | 963.0$^{a}$ | 1.2 |
| 粗脂肪 EE/(g/kg DM) | 27.9$^{b}$ | 50.0$^{a}$ | 4.8$^{d}$ | 13.6$^{c}$ | 0.6 |
| 中性洗涤纤维 NDF/(g/kg DM) | 517.6$^{c}$ | 598.9$^{a}$ | 530.9$^{b}$ | 359.3$^{d}$ | 2.6 |
| 酸性洗涤纤维 ADF/(g/kg DM) | 145.9$^{d}$ | 422.6$^{a}$ | 255.8$^{b}$ | 240.3$^{c}$ | 2.5 |
| 酸性洗涤木质素 ADL/(g/kg DM) | 23.9$^{c}$ | 107.2$^{a}$ | 50.5$^{b}$ | 26.5$^{c}$ | 2.8 |
| 纤维素 Cellulose/(g/kg DM) | 122.1$^{c}$ | 315.4$^{a}$ | 205.3$^{b}$ | 213.7$^{b}$ | 2.7 |
| 半纤维素 Hemicellulose/(g/kg DM) | 371.7$^{a}$ | 176.3$^{c}$ | 275.1$^{b}$ | 119.0$^{d}$ | 3.3 |
| 淀粉 Starch/(g/kg DM) | 106.3$^{a}$ | 10.9$^{c}$ | 5.5$^{d}$ | 32.7$^{b}$ | 0.8 |
| 碳水化合物 CHO/(g/kg DM) | 706.4$^{d}$ | 758.4$^{b}$ | 807.0$^{a}$ | 720.5$^{c}$ | 1.0 |
| 粗蛋白质 CP/(g/kg DM) | 205.4$^{b}$ | 146.2$^{c}$ | 129.5$^{d}$ | 231.2$^{a}$ | 1.0 |
| 可溶性粗蛋白质 SCP/(g/kg CP) | 643.8$^{a}$ | 296.5$^{c}$ | 238.8$^{d}$ | 413.6$^{b}$ | 3.7 |
| 非蛋白氮 NPN/(g/kg SCP) | 930.7$^{a}$ | 448.5$^{d}$ | 691.1$^{c}$ | 748.7$^{b}$ | 7.0 |
| 酸性洗涤不溶粗蛋白质 ADICP/(g/kg CP) | 15.2$^{c}$ | 61.0$^{b}$ | 89.3$^{a}$ | 18.5$^{c}$ | 1.0 |
| 中性洗涤不溶粗蛋白质 NDICP/(g/kg CP) | 154.5$^{c}$ | 263.6$^{b}$ | 445.4$^{a}$ | 93.5$^{d}$ | 3.7 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 非结构性碳水化合物 NSC/(g/kg CHO) | 312.2[c] | 261.1[d] | 413.5[b] | 527.3[a] | 2.4 |

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著（$P$<0.05），相同或无字母表示差异不显著（$P$>0.05）。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P$<0.05), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P$>0.05). The same as below.

## 2.2 CNCPS 对 4 种粮食加工副产物蛋白质和 CHO 组分的剖分

从表 2 可见，不同粮食加工副产物蛋白质和 CHO 组分存在较大差异。

在对蛋白质组分的剖分中，玉米纤维饲料的 PA 含量最高（599.2 g/kg CP），显著高于其他粮食加工副产物($P$＜0.05)，PC 含量最低（15.2 g/kg CP），显著低于其他粮食加工副产物（$P$<0.05）。大豆皮的 PB 含量最高(806.8 g/kg CP)，显著高于其他粮食加工副产物($P$＜0.05)，PA 含量最低（132.8 g/kg CP），显著低于其他粮食加工副产物（$P$<0.05）。甜菜粕的 $PB_3$ 含量最高(355.4 g/kg CP)，显著高于其他粮食加工副产物($P$＜0.05)。豆渣的 PC 含量最高(106.5 g/kg CP)，显著高于其他粮食加工副产物($P$＜0.05)。

在对 CHO 组分的分剖分中，玉米纤维饲料的 $CB_1$ 与 $CB_2$ 含量显著高于其他粮食加工副产物($P$＜0.05)，CC 含量最低（81.4 g/kg CHO）。大豆皮的 CC 含量最高（349.8 g/kg CHO），显著高于其他粮食加工副产物($P$＜0.05)，$CB_1$ 含量最低（31.4 g/kg CHO），显著低于其他粮食加工副产物（$P$<0.05）。豆渣的 CA 含量最高（481.7 g/kg CHO），显著高于其他粮食加工副产物($P$＜0.05)，$CB_1$ 和 $CB_2$ 的含量都较低。从 CHO 组分分析来看，玉米纤维饲料的营养价值最高。

表 2　CNCPS 对不同粮食加工副产物的蛋白质和碳水化合物的剖分

Table 2　Partition of subfractions of protein and carbohydrate of different by-products of food processing using CNCPS　（$n$=3）

| 项目 Items | 玉米纤维饲料 DCGF | 大豆皮 SH | 甜菜粕 SBP | 豆渣 BR | 标准误 SEM |
|---|---|---|---|---|---|
| 蛋白质组分 Protein composition/ (g/kg CP) | | | | | |
| 非蛋白氮 PA | 599.2[a] | 132.8[d] | 165.0[c] | 309.6[b] | 5.0 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 快速降解真蛋白质 $PB_1$ | 44.6[d] | 163.6[a] | 73.8[c] | 104.0[b] | 5.6 |
| 中速降解真蛋白质 $PB_2$ | 204.8[d] | 439.9[a] | 317.1[c] | 404.9[b] | 7.6 |
| 慢速降解真蛋白质 $PB_3$ | 139.3[c] | 203.3[b] | 355.4[a] | 75.0[d] | 3.7 |
| 不可降解氮 PC | 15.2[d] | 60.4[c] | 88.7[b] | 106.5[a] | 3.5 |
| 真蛋白质 PB | 388.6[d] | 806.8[a] | 746.3[b] | 583.9[c] | 6.0 |
| 碳水化合物组分 CHO composition/(g/kg CHO) | | | | | |
| 快速降解碳水化合物 CA | 71.7[c] | 229.7[b] | 231.2[b] | 481.7[a] | 3.7 |
| 中速降解碳水化合物 $CB_1$ | 239.5[a] | 31.4[d] | 182.3[b] | 44.2[c] | 1.2 |
| 缓慢降解碳水化合物 $CB_2$ | 607.4[a] | 389.1[c] | 436.2[b] | 380.3[c] | 11.4 |
| 不可利用碳水化合物 CC | 81.4[c] | 349.8[a] | 150.3[b] | 88.4[c] | 12.5 |

2.3　使用 CNCPS 模型对不同粮食加工副产物能量供给量的预测

从表 3 可见，玉米纤维饲料的 RDP 含量最高，甜菜粕的 RUP 含量最高，玉米纤维饲料的 RUP 含量最低。豆渣的 AECP 含量显著低于其他粮食加工副产物($P$＜0.05)。各粮食加工副产物的 MP 含量差异显著($P$＜0.05)，豆渣最高，玉米纤维饲料最低。根据 $MCP_{TDN}$ 与 $MCP_{RDP}$ 的差值，可得出 REND 的值。玉米纤维饲料与豆渣的 REND 为负值，说明其能量供给不足，可降解蛋白质供给量过剩；大豆皮与甜菜粕的 REND 为正值，说明其能量供给过剩，可降解蛋白质供给量不足。

表 3　不同粮食加工副产物对奶牛潜在营养供应量的预测

Table 3　Prediction of potential nutrient supply to dairy cattle from different by-products of food processing （$n$=3）

| 项目 Items | 玉米纤维饲料 DCGF | 大豆皮 SH | 甜菜粕 SBP | 豆渣 BR | 标准误 SEM |
|---|---|---|---|---|---|
| 瘤胃可降解蛋白质 RDP/（%CP） | 77.4[a] | 52.0[c] | 46.3[d] | 54.3[b] | 0.6 |
| 瘤胃可降解蛋白质 RDP/（g/kg DM） | 159.6[a] | 76.5[c] | 60.4[d] | 126.6[b] | 0.7 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 过瘤胃蛋白质 RUP/（%CP） | 20.7[d] | 48.5[b] | 52.9[a] | 45.2[c] | 0.3 |
| 过瘤胃蛋白质 RUP/（g/kg DM） | 41.6[c] | 70.5[b] | 69.2[b] | 104.7[a] | 0.4 |
| 菌体蛋白质 MCP/（g/kg DM） | 89.5[b] | 83.4[c] | 75.0[d] | 91.0[a] | 0.2 |
| 可吸收菌体蛋白质 AMCP/（g/kg DM） | 56.8[b] | 53.6[c] | 48.4[d] | 58.2[a] | 0.3 |
| 可吸收过瘤胃蛋白质 ARUP/（g/kg DM） | 35.4[c] | 60.1[b] | 58.8[b] | 89.3[a] | 0.5 |
| 内源蛋白质 ECP/（g/kg DM） | 11.7[a] | 10.7[b] | 10.1[b] | 3.4[c] | 0.3 |
| 可吸收内源蛋白 AECP/（g/kg DM） | 4.5[a] | 4.5[a] | 4.5[a] | 1.4[b] | 0.2 |
| 可代谢蛋白质 MP/（g/kg DM） | 96.9[d] | 117.8[b] | 111.1[c] | 148.2[a] | 0.5 |
| 瘤胃可降解蛋白质可合成菌体蛋白质 $MCP_{RDP}$/（g/kg DM） | 143.4[a] | 69.0[c] | 54.3[d] | 113.9[b] | 0.7 |
| 总可消化养分可合成菌体蛋白质 $MCP_{TDN}$/（g/kg DM） | 88.9[b] | 83.5[c] | 75.4[d] | 91.3[a] | 0.6 |
| 瘤胃能氮平衡 RENB/（g/kg DM） | -54.5 | 14.5 | 21.1 | -22.6 | 1.0 |

## 2.4 NRC 模型估测不同粮食加工副产物可消化养分含量和能值

从表 4 可见，豆渣的 tdNFC 含量最高（375.2 g/kg DM），显著高于其他粮食加工副产物($P$＜0.05)，这与其含有较低含量的纤维素和半纤维素有关；豆渣的 tdCP 含量最高（229.5 g/kg DM），显著高于其他粮食加工副产物($P$＜0.05)，这与其常规营养成分分析中较高的 CP 含量和较低的 ADICP 含量结果相一致。玉米纤维饲料的 tdNDF 含量最高（301.4 g/kg DM），显著高于其他粮食加工副产物（$P$<0.05），这与常规营养成分分析中的 NDF 和 ADF 的含量有关。豆渣和玉米纤维饲料的 $TDN_m$ 含量较高，且差异不显著（$P$>0.05）；甜菜粕的 $TDN_m$ 含量最低（576.7 g/kg DM），显著低于其他粮食加工副产物（$P$<0.05）；豆渣的 $DE_P$、$ME_P$、$NE_{LP}$、$NE_M$ 和 $NE_G$ 值最高，玉米纤维饲料次之，大豆皮和甜菜粕的各能值水平较低。

表 4 NRC 模型估测不同粮食加工副产物的可消化养分含量和能值

Table 4 Prediction of digestible nutrient contents and energy values of different by-products of food processing using NRC model （$n$=3）

| 项目 Items | 玉米纤维饲料 DCGF | 大豆皮 SH | 甜菜粕 SBP | 豆渣 BR | 标准误 SEM |
|---|---|---|---|---|---|
| 真可消化养分 tdN/(g/kg DM) | | | | | |
| 真可消化非纤维碳水化合物 tdNFC | 212.4[c] | 192.6[d] | 327.0[b] | 375.2[a] | 2.01 |
| 真可消化粗蛋白质 tdCP | 199.3[b] | 143.4[c] | 124.9[d] | 229.5[a] | 1.58 |
| 真可消化中性洗涤纤维 tdNDF | 301.4[a] | 290.4[b] | 195.3[c] | 158.5[d] | 1.84 |
| 真可消化脂肪酸 tdFA | 42.4[b] | 87.4[a] | | 6.5[c] | 1.04 |
| 估测总可消化养分 Predicted TDN/(g/kg DM) | | | | | |
| 维持水平总可消化养分 $TDN_m$ | 685.6[a] | 642.4[b] | 576.7[c] | 699.7[a] | 1.61 |
| 估测能值 Predicted energy values/(MJ/kg DM) | | | | | |
| 生产水平消化能 $DE_P$ | 12.26[b] | 11.65[c] | 10.65[d] | 12.68[a] | 0.11 |
| 生产水平代谢能 $ME_P$ | 10.73[b] | 9.61[c] | 8.75[d] | 11.22[a] | 0.14 |
| 生产水平泌乳净能 $NE_{LP}$ | 6.65[ab] | 6.26[b] | 5.50[c] | 6.92[a] | 0.13 |
| 维持净能 $NE_m$ | 6.90[b] | 6.29[c] | 5.21[d] | 7.43[a] | 0.03 |
| 增重净能 $NE_g$ | 4.32[b] | 3.67[c] | 2.70[d] | 4.69[a] | 0.08 |

## 3 讨 论

### 3.1 不同粮食加工副产物的营养成分

本试验较全面地分析了我国几种比较常见的粮食加工副产物的营养成分。大豆皮营养成分的含量与石风华等[16]研究的结果相比，除了 ADL、ADICP 含量略高外，其他营养成分含量基本接近。大豆皮细胞壁成分（NDF、ADF 和 ADL）含量较高，能够有效地促进奶牛瘤胃健康。豆渣营养成分含量与穆会杰等[18]的研究结果相比，除 CP 含量略高，EE 含量与 SCP 含量略低外，其他营养成分含量基本接近。本试验结果与其他研究相比有差异，这可能与原料来源、品种及加工工艺有关。如大豆原料品质不同，豆渣的 CP 含量也不同。另外，加工方法也影响其营养价值[17]。目前，国内关于玉米纤维饲料的营养成分研究报道较少，本研究中玉米纤维饲料营养成分含量与潘春芳等[18]报道的湿玉米纤维饲料（WCGF）相比，除

DM、ADF、SCP、ADICP 含量略高外，其他营养成分含量基本相近。玉米纤维饲料的淀粉含量虽然高于其他粮食加工副产物，但与其原料玉米相比，淀粉含量仅占玉米的 1/6 不到；且玉米纤维饲料可消化 NDF 含量高于普通粗饲料，对稳定奶牛瘤胃发酵有重要作用。国外有关玉米纤维饲料低淀粉、高果胶、高可发酵 CHO 含量对保证奶牛、肉牛瘤胃健康的报道已有很多[4, 19]。甜菜粕的 CHO 含量最高，NSC 含量达到 CHO 含量的 1/2，淀粉含量最低，果胶含量很高，这与林曦等[14]结果一致。从 CHO 角度分析，玉米纤维饲料和甜菜粕的营养水平较高；从蛋白质角度分析，豆渣具有更明显的优势。

3.2　不同粮食加工副产物蛋白质和 CHO 营养成分

在大量研究反刍动物瘤胃发酵规律和饲料分析方法的基础上，CNCPS 体系把饲料成分的化学分析与反刍动物瘤胃的消化利用结合起来，使得饲料营养价值评价结果对科研和生产实践更具有参考价值，同时也反映出动物营养学新的发展方向。周俊华等[21]研究表明，PA 对反刍动物具有较高的营养价值，但对于单胃动物营养价值很低。玉米纤维饲料含有较高的 PA 含量，可以为瘤胃微生物提供充足的氮源。玉米纤维饲料是由玉米皮和玉米浆混合干燥制成，未喷浆的玉米皮 CP 含量大约为 9.50% DM，而玉米浆 CP 中 SCP 和 NPN 比例较大，因此二者混合后生产的玉米纤维饲料含有的 PA 含量较高，而 PB 含量较低。本研究结果中大豆皮和豆渣的 $PB_2$ 含量高于玉米纤维饲料和甜菜粕，后两者的蛋白质比其他饲料具有更高的优势。PC 部分不能被瘤胃微生物消化，一般认为在反刍动物饲粮中 PC 含量不能超过 10%[21]。4 种粮食加工副产物中豆渣的 PC 含量最高，说明其 CP 降解率较低。大豆皮和甜菜粕 PB 含量相近，但 $PB_2$ 和 $PB_3$ 含量差异较大，可能是与 2 种饲料蛋白质分子结构不同有关。

CNCPS 将 CHO 划分为 NSC 和 SC，在此基础上，根据饲料样品在瘤胃中降解的速度，进一步将 NSC 划分为 CA、$CB_1$，将 SC 划分为 $CB_2$、CC[21]。瘤胃微生物能将 SC 发酵产生挥发性脂肪酸，为奶牛提供能量。玉米纤维饲料的 $CB_1$ 和 $CB_2$ 含量最高，说明玉米纤维饲料的可利用纤维含量较高。大豆皮的 CC 含量显著高于其他几种粮食加工副产物，这是由于其 ADL 含量较高导致的。甜菜粕的 $CB_1$ 组分主要为果胶，对于稳定反刍动物瘤胃发酵有重要作用[22]。豆渣的 CA 含量最高，说明其快速降解的可溶性糖含量较高。综合 CHO 的各组分分析来看，玉米纤维饲料、甜菜粕、大豆皮可以作为奶牛的纤维原饲料。

3.3　潜在营养价值

在 CNCPS 蛋白质剖分体系中，饲料蛋白质包括 PB 和 PA。CP 一般在瘤胃中有 70%被微生物降解，即 RDP；剩余的 CP 不被降解，即 RUP 部分。瘤胃微生物蛋白质利用饲料提供的碳源和氮源生长繁殖合成 MCP，并同 RUP 进入真胃和小肠，被分解成肽和氨基酸被利用。NRC(2001)建议，RUP 的饲喂量占奶牛饲粮 CP 的 33%～40%，RUP 对高产奶牛和泌乳早期奶牛非常重要[14]。RDP 是合成 MCP 的主要氮源，对反刍动物瘤胃代谢至关重要。在 CNCPS 预测模型中，MCP 产量与饲料的 $TDN_m$ 含量呈正相关关系，本试验结果表明豆渣的 $TDN_m$ 含量最高，其次为玉米纤维饲料，甜菜粕最低，故豆渣的 MCP 含量最高，而甜菜粕 MCP 含量最低。瘤胃内源氮 ECP 的含量与饲料 DM 含量呈正相关，且有 50%的 ECP 可到达十二指肠被吸收利用，故豆渣 ECP 和 AECP 含量显著低于其他 3 种粮食加工副产物。MP 在小肠中吸收的蛋白质的总和，以豆渣的 MP 含量最高，其次为大豆皮，而玉米纤维饲料最低。从蛋白质角度分析，豆渣对奶牛的潜在营养量及营养价值最高。

瘤胃微生物蛋白质的合成效率是反刍动物饲料蛋白质利用率的决定因素，另外 CHO、脂肪等营养物质的分解，也依赖于瘤胃微生物。而瘤胃微生物的生长和繁殖要以蛋白质降解释放的氮为营养，以 CHO 为能量，只有两者平衡才能使微生物生长、繁殖效率最佳，饲粮营养成分的利用才更为有效。饲粮的能氮平衡过程，就是分别根据饲粮的 TDN 和 RDP 含量分别推算 MCP 的合成量，计算两者之差。如果差值为零，则表明平衡良好；差值为负，则前者不足需要补充；差值为正，则后者不足需要补充[23]。玉米纤维饲料与豆渣的 REND 为负值，大豆皮与甜菜粕的 REND 为正值，4 种粮食加工副产物的能氮供给都不平衡。玉米纤维饲料和豆渣需补充能量饲料，大豆皮与甜菜粕需补充蛋白质饲料。

3.4　不同粮食加工副产物的可消化养分含量和能值

NRC 模型根据饲料的真可消化养分含量估测饲料的能量供给量，各营养组分对能量的贡献能力不同。豆渣和甜菜粕的 tdNFC 含量较高，原因是其非纤维性碳水化合物（NFC）含量较高，并且在计算饲料 tdNFC 时，需要考虑饲料的加工校正因子（processing adjustment factor，PAF）[24]。豆渣和玉米纤维饲料的 tdCP 含量较高，饲料 CP 对能量的贡献率主要与 CHO 和 ADICP 含量有关[24]。甜菜粕的 tdFA 含量极少，对能量的贡献值为零。尽管大豆皮的 NDF 含量高于玉米纤维饲料，但其 tdNDF 含量低于玉米纤维饲料，即 4 种粮食加工副产物中玉米纤维饲料的 NDF 对能量供应的贡献值最大。Biricik 等[25]和 Kelzer 等[26]也报道玉米

纤维饲料的瘤胃可降解 NDF 含量高，可发酵的纤维性 CHO 含量较高。因此，豆渣的 $TDN_m$ 含量最高，玉米纤维饲料次之，甜菜粕最低，且相应的能量值 $DE_P$、$ME_P$、$NE_{LP}$、$NE_M$ 和 $NE_G$ 也具有相同的趋势。这表明在提供能量方面，豆渣和玉米纤维饲料具有的更强的优势。但是，试验原料的可消化养分及各能值是基于前人的预测模型所得，非体内代谢试验实测值，还需要进一步的体内试验进行验证比较。

CNCPS 体系自产生以来，不断更新，在生产中显示了很好的应用价值。在 CNCPS 体系中，饲料代谢蛋白质的计算引用了 NRC（2001）模型的代谢蛋白质的计算方式。NRC（2001）模型是目前世界各地广泛应用的奶牛饲养标准。在 NRC 体系中，将饲料蛋白质分解为 RDP 和 RUP 2 部分。而在 CNCPS 中，将饲料蛋白质分为 PA、$PB_1$、$PB_2$、$PB_3$ 和 PC 5 部分，其中 $PB_1$、$PB_2$、$PB_3$ 和 PC 被认为是经过瘤胃到达小肠的蛋白质，比 NRC（2001）模型的划分更为详细。NRC（2001）模型引用了 CNCPS 分析方法，通过饲料中 TDN 值，计算出饲料蛋白质在瘤胃以及小肠中的变化及饲料能值，所以模型也叫以 CNCPS 为基础的模型。在实际生产过程中，可以根据需要进行相关的体系综合分析与测定，进行更好的实践指导。

## 4 结 论

① 不同粮食加工副产物的 CP、NDF、纤维素、NSC 等含量不同，因而不同副产物对反刍动物的 MCP、MP、各能量等营养物质供给量存在差异，但是各营养值均为模型推算结果，还需要在动物试验中进一步验证。

② 玉米纤维饲料和大豆皮的 tdNDF 含量较高，可以作为奶牛的纤维源饲料；豆渣的 RUP、MP 含量最高，可以作为奶牛的蛋白质源饲料。

③ 豆渣的 MCP 和 MP 含量最高；玉米纤维饲料的 $TDN_m$ 含量仅次于豆渣，因而 4 种粮食加工副产物的能值由高到低依次为：豆渣、玉米纤维饲料、大豆皮、甜菜粕。

参考文献：

[1] 曹日亮,胡广英.非粮型饲料资源的开发利用[J].农产品加工,2003(8):5–6.

[2] 侯炳刚,高艳霞,袁广珍,等.大豆皮的营养价值及其在奶牛生产中的应用[J].黑龙江畜牧兽医:科技版,2009(8):59–61.

[3] 鲁琳,孟庆翔,史敬飞,等.大豆皮替代产奶牛日粮精料中玉米与小麦麸对产奶性能的影响

[J].中国畜牧杂志,2001,37(1):13–15.

[4] FIRKINS J L,EASTRIDGE M L,PALMQUIST D L.Replacement of corn silage with corn gluten feed and sodium bicarbonate for lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,1991,74(6):1944–1952.

[5] 林祥金.非常规饲料资源在现代肉牛业的发展应用[J].北方牧业,2009(9):8–9.

[6] 孙国栋,吕桂英,张天平,等.发展非粮饲料是保障粮食安全的重要途径[J].吉林畜牧兽医,2011,32(2):52–53.

[7] SNIFFEN C J,O'CONNOR J D,VAN SOEST P J,et al.A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: Ⅱ.Carbohydrate and protein availability[J].Journal of Animal Science,1992,70(11):3562–3577.

[8] AOAC.Official methods of analysis[M].17th ed.Arlington:Association of Official Analytical Chemists,2000.

[9] VAN SOEST P J,SNIFFEN C J,MERTENS D R,et al.A net protein system for cattle:the rumen submodel for nitrogen[C]//OWENS F N.Protein requirements for cattle:proceedings of an international symposium.Stillwater:Oklahoma State University,1981:265.

[10] KRISHNAMOORTHY U,SNIFFEN C J,STERN M D,et al.Evaluation of a mathematical model of rumen digestion and an *in vitro* simulation of rumen proteolysis to estimate the rumen-undegraded nitrogen content of feedstuffs[J].British Journal of Nutrition,1983,50(3):555–568.

[11] LICITRA G,HERNANDEZ T M,VAN SOEST P J.Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds[J].Animal Feed Science and Technology,1996, 57(4):347–358.

[12] FOX D G, TYLUTKI T P, TEDESCHI L O,et al.The net carbohydrate and protein system for evaluating herd nutrition and nutrient excretion[C]//The Cornell University nutrient management planning system,Animal science department mimeo 213.Ithaca:Cornell University,2003.

[13] 林曦.甜菜渣青贮营养价值的评定及其在奶牛生产中应用的研究[D].硕士学位论文.哈尔

滨:东北农业大学,2010.

[14] NRC.Nutrient requirements of dairy cattle[S].7th rev. ed.Washington,D.C.:National Academy Press,2001.

[15] NRC.Nutrient requirements of beef cattle[S].7th ed.Washington,D.C.:National Academy Press,1996.

[16] 石风华.非常规饲料替代玉米饲喂肉牛对瘤胃发酵、养分消化率、生产性能和胴体品质的影响[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2014.

[17] 穆会杰,刘庆华,邢其银.豆腐渣对反刍动物饲用价值研究[J].中国饲料,2013(23):39–42.

[18] 潘春芳.湿玉米纤维饲料在奶牛生产中的应用及其保存技术的研究[D].博士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2014.

[19] SARWAR M,FIRKINS J L,EASTRIDGE M L.Effect of replacing neutral detergent fiber of forage with soyhulls and corn gluten feed for dairy heifers[J].Journal of Dairy Science,1991,74(3):1006–1017.

[20] 周俊华,邹彩霞,梁贤威,等.应用康奈尔净碳水化合物-蛋白质体系评定广西水牛常用粗饲料的营养价值[J].动物营养学报,2011,23(12):2190–2197.

[21] 计成.动物营养学[M].北京:高等教育出版社,2007.

[22] 刘晶,刘建新.饲料果胶对瘤胃微生物菌群和发酵特性及蛋白质合成的影响[J].中国畜牧杂志,2014,50(23):93–98.

[23] 张丽君,金双勇.试用瘤胃能氮平衡原理评价奶牛日粮[J].中国乳业,2005(11):33–34.

[24] [美]国家科学研究委员会.奶牛营养需要(第七次修订版)[M].孟庆翔,译.北京:中国农业大学出版社,2002.

[25] BIRICIK H,GENCOGLU H,BOZAN B,et al.The effect of dry corn gluten feed on chewing activities and rumen parameters in lactating dairy cows[J].Italian Journal of Animal

Science,2007,6(1):61–70.

[26] KELZER J M,KONONOFF P J,TEDESCHI L O,et al.Evaluation of protein fractionation and ruminal and intestinal digestibility of corn milling co-products[J].Journal of Dairy Science,2010,93(6):2803–2815.

Evaluation of Nutrition Values of 4 Kinds of By-Products of Food Processing Using Cornell Net Carbohydrate and Protein System and National Research Council Models[2]

GAO Hong HAO Xiaoyan ZHANG Xingyi WANG Yizhen LIN Cong ZHANG Yonggen*

(*Northeast Agricultural University*, *College of Animal Science and Technology*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: This study was conducted to evaluate the nutrition values of 4 kinds of by-products of food processing using Cornell net carbohydrate and protein system (CNCPS) and national research council (NRC) models. Dry corn gluten feed (DCGF), soybean hulls (SH), sugar beet pulp (SBP) and bear residue (BR) from four different pastures in northeast China were collected to determine nutrient compositions, and partition of the protein and carbohydrate subfractions using CNCPS system. The predicted nutrient supply of by-products of food processing was estimated based on CNCPS system. Finally, the digestible nutrient contents and energy values were predicted using NRC models. The results showed as follows:1) the contents of neutral detergent fiber (NDF) from high to low in turn were SH, SBP, DCGF and BR; the contents of non-protein nitrogen (NPN) from high to low in turn were DCGF, BR, SBP and SH; the content of acid detergent insoluble crude protein (ADICP) was the highest in SBP, the contents of others from high to low in turn were SH, DCGF and BR, the contents of ADICP in DCGF and BR had no significant difference ($P>0.05$). 2) The contents of non protein nitrogen (PA) from high to low in

*Corresponding author, professor, E-mail: zhangyonggen@sina.com (责任编辑 武海龙)

turn were DCGF, BR, SBP, SBP and SH; the contents of true protein (PB) from high to low in turn were SH, SBP, BR and DCGF; the contents of undegradable nitrogen (PC) from high to low in turn were BR, SBP, SH and DCGF. 3) The contents of microbial protein (MP) from high to low in turn were BR, SH, SBP and DCGF. 4) The contents of total digestible nutrients at maintenance (TDNm) were higher in DCGF and BR, and there was no significant difference between them ($P>0.05$); the values of net energy for lactation at production level ($NE_{LP}$) from high to low in turn were BR, DCGF, SH and SBP, and the $NE_{LP}$ in DCGF had no significant difference from BR and SH ($P>0.05$); the values of the metabolizable energy at production level ($ME_P$) from high to low in turn were BR, DCGF, SBP and SH. The results indicate that DCGF and SH can be used as a fiber source in dairy cattle feed; the contents of rumen bypass protein and MP are highest in BR, which can be used as a protein source in dairy cattle feed. The energy values from high to low in turn are BR, DCGF, SH and SBP.

Key words: by-product of food processing; nutrient component; energy values